

論文・解説

31

## 水資源の有効活用技術

## Technologies for Effective Utilization of Water Resources

松本 祐太郎 <sup>*1</sup>	矢野 雅人 <sup>*2</sup>	有村 恒星 <sup>*3</sup>
Yutaro Matsumoto	Masato Yano	Kosei Arimura
添田 伸行 <sup>*4</sup>	綿崎 修 <sup>*5</sup>	古瀬 亘 <sup>*6</sup>
Nobuyuki Soeda	Osamu Watasaki	Wataru Furuse

## 要約

地球上の水のうち、利用可能な水は全体の0.01%に過ぎず、気候変動や人口増加により多くの国が水リスクや水ストレスに直面している。企業に持続可能性が求められる中で、水資源の管理も重要視されてきている。マツダでは、“水資源を価値あるものに使い切る”を目指す姿として水資源の有効活用に取り組んでいる。マザー工場である本社工場と防府工場を中心に、2030年度までに取水量を2013年度比で38%削減する目標を掲げ、「維持管理（漏水防止）」、「リデュース&リユース（節水）」、「リサイクル（再生水利用）」の3つの軸で活動を展開している。更に、水資源の有効活用の観点から「雨水利用」も進めている。本論文では、各活動軸における課題と具体的な取り組みとして、「機械学習を用いた漏水検知」、「塗装工場の節水」、「トイレフラッシング水への再生水・雨水利用」について、成果を報告する。

## Abstract

Only 0.01% of the water on Earth is available for use, and many countries are facing water risks and water stress due to climate change and population growth. As companies are required to prioritize sustainability, the management of water resources is also gaining attention. Mazda is committed to effectively utilizing water resources under the vision of “making the most of valuable water resources”. Focusing on our mother plants, the Hiroshima Plant and the Hofu Plant, we have set a goal to reduce water intake by 38% compared to the 2013 level by the fiscal year 2030. We are developing activities based on three pillars: “Maintenance (Leak Prevention)”, “Reduce & Reuse (Water Conservation)” and “Recycling (Use of Recycled Water)”. Additionally, from the perspective of effective water resource utilization, we are also promoting the use of rainwater. This paper reports the results of the challenges and specific initiatives within each activity pillar, including “Leak Detection Using Machine Learning”, “Water Conservation in Paint Shops”, and “Utilization of Recycled Water and Rainwater for Toilet Flushing”.

**Key words** : Water resources, Machine learning, Reduce, Reuse, Recycling

## 1. はじめに

地球上に存在する水の中で、人が利用しやすい状態で存在する水の量は全体の0.01%とわずかであり、偏在している。更に近年、気候変動による干ばつや洪水、人口増加、経済発展による水の需要急増などを理由に、多くの国が水リスクや水ストレスに直面している。このような背景から、CSRやサステナビリティの視点においても、水資源の管理が重要視されてきている。ESG投資やCDP<sup>\*1</sup>での水資源への重要性も急速に高まっており、マ

ツダもCDPへの参加を通じて、環境リスクの開示と透明性の向上を図っている。

マツダでは、地球と共存できる企業を目指し、クルマの商品開発を行うとともに、水資源の有効活用にも力を入れている。“水資源を価値あるものに使い切る（＝無駄なく有効活用する）”を目指す姿（Fig. 1）とし、マツダのマザー工場である本社工場と防府工場から優先的に取り組みを進めている。目指す姿を達成するための中期目標として、国内マツダグループ全体の取水量を2030年度に2013年度比で38%削減する目標を定めている

\*1~4 プラント技術部  
Plant Engineering Dept.

\*5,6 第1車両製造部  
Vehicle Production Dept. No.1

(Fig. 2)。この目標達成と水資源の有効活用のために、「維持管理」、「リデュース&リユース (節水)」、「リサイクル (再生水利用)」、「雨水利用」に取り組んでいる。雨水利用では、雨水を貯蔵タンクに貯めるため、災害時にも水源を確保できるだけでなく、周辺地域の取水を妨げないことにも貢献できる。水資源の有効活用の方針としては、まず配管等の維持管理により漏水をなくし、節水で水使用量を最小化した上で再生水や雨水に置き換えるという流れで進めている (Fig. 3)。本論文では、マツダで行っているこれら取り組みについて紹介する。

※1 環境分野に取り組む国際 NGO

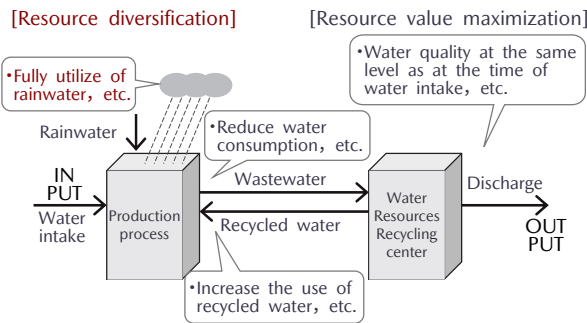


Fig. 1 The Vision for Effective Utilization of Water Resources

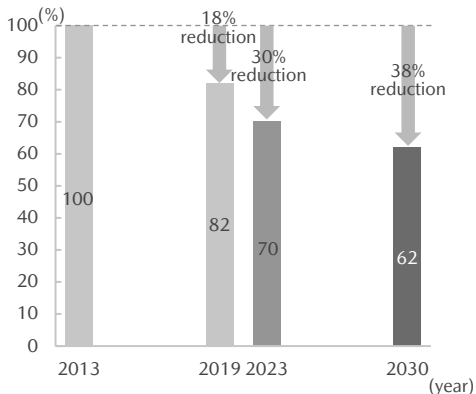
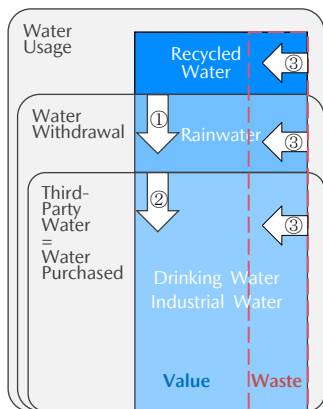


Fig. 2 Actual Water Intake and Reduction Target



- ①Reduction in water withdrawal through the use of recycled water
- ②Reduction in third-party water through the use of rainwater
- ③Reduction of waste through water conservation

Fig. 3 Definitions of Water Intake and Usage at Mazda

## 2. 各活動軸における課題

前章で述べた各活動軸における課題について紹介する。「維持管理」に関しては、マツダ構内 (約 220 万 m<sup>2</sup>) に敷設している水配管 (総敷設長約 180km) の計画更新を行っているが、更新前に漏水が発生してしまうことがある。また、水使用設備の異常やヒューマンエラーで漏水するケースもある。漏水をすぐに発見できる場合も多いが、埋設配管の場合は発見が難しく、長時間の漏水は道路の陥没リスクにもつながる。そのようなリスクを未然に防ぐために、水メーターの数値を監視モニターや定期検針等で確認しているが、漏水かどうかの切り分けが難しく、漏水を見逃してしまうという問題があった。これに対し、データをうまく使い、漏水かどうかを的確に判断できる仕組みの構築が課題であった。

「節水」に関しては、これまで、生活領域である手洗いやトイレへの節水型器具の導入や冷却塔補給量の適正化に取り組んできた。しかし、マツダの水使用量の約 80% は生産領域である。そのため、目標達成のためには、この領域に踏み込んでいかなければならないが、水質がクルマの生産品質に直結するため、ほとんど踏み込めずにいた。そのため、生産品質に影響を与えず、あるいは良い影響を与えつつ水使用量を削減することが課題であった。

「再生水利用」に関しては、再生水の活用用途や廃水の再生手段等、取り組みを進めていくための方針が定まっていなかった。そのため、どのように再生水を作り、何に利用するのかといった方針を策定しつつ再生水利用の具体化を進めることが課題であった。

上記の各課題に対して取り組んだ結果を次章から説明する。

## 3. 機械学習を用いた漏水検知

### 3.1 概要

水使用量の数値から漏水を的確に判定するために、機械学習による異常検知を適用することを検討した。機械学習による異常検知は、データ間が複雑な非線形関係でも扱うことができるため、従来の重回帰分析よりも適していると考えた。水使用量と相関の高い特徴量を抽出し、水使用量との関係性を学習させることで、漏水が起きた際の異常を検知できる仕組みの構築を目指した。本論文では、構内のあるエリアに対して実施した結果について報告する。

### 3.2 特徴量の抽出

水使用量と相関がありそうな特徴量として、外気温、降雨量、日射量、月、日、曜日、工場稼働/非稼働、電力使用量 (工場 A ~ I) を特定し、水使用量との相関性を確認した。相関係数 0.5 以上を基準とした結果、曜日、

工場稼働／非稼働、電力使用量（工場 A～E）を機械学習に用いる特徴量として抽出した。特に相関係数の高かった 2 つを Fig. 4 に示す。

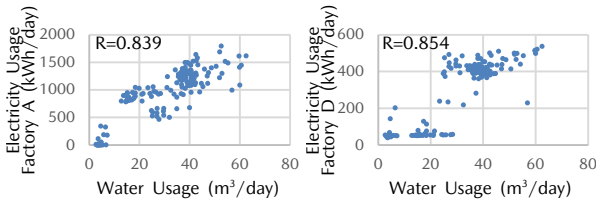


Fig. 4 Correlation between Water Usage and Features

### 3.3 学習モデルと予測結果

Python<sup>※2</sup>を用いて機械学習モデルを構築した。アンサンブル学習手法<sup>※3</sup>であるスタッキング法<sup>※4</sup>を採用し、2つのベースモデル<sup>※5</sup>とメタモデル<sup>※6</sup>を組み合わせることで予測精度の向上を図った。2023/3/1～2023/7/31を学習期間とし、この期間における水使用量（m<sup>3</sup>/日）と各特徴量をモデルに学習させた。なお、この学習期間では漏水が起きていなかったことを確認済みである。次に2023/8/1～2024/2/12を予測期間とし、この期間における各特徴量から水使用量を予測させた。予測精度の評価には、MSE（平均2乗誤差）、MAE（平均絶対誤差）、R<sup>2</sup>（決定係数）を用いた。その結果を Table 1 に示す。

Table 1 MSE, MAE, and R<sup>2</sup> of Each Model

	Base model ①	Base model ②	Stacking method
MSE	24.1	16.1	15.5
MAE (m <sup>3</sup> /day)	3.91	2.87	2.82
R <sup>2</sup>	0.90	0.92	0.93

メタモデルの導入により、ベースモデル単体よりもMSE, MAE, R<sup>2</sup>が改善しており、精度が向上したことを確認できた。また、本モデルのMAEが2.82m<sup>3</sup>/日であり、学習範囲内データの平均値が約30m<sup>3</sup>/日であることを考慮すると、本モデルの予測には約10%の誤差があるといえる。それを踏まえて、予測結果を確認してみる。学習範囲内データに対する予測結果を Fig. 5、学習範囲外データに対する予測結果を Fig. 6 に示す。

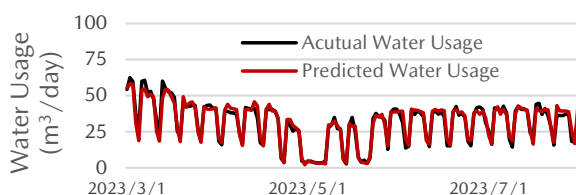


Fig. 5 Prediction Results for In-Sample Data

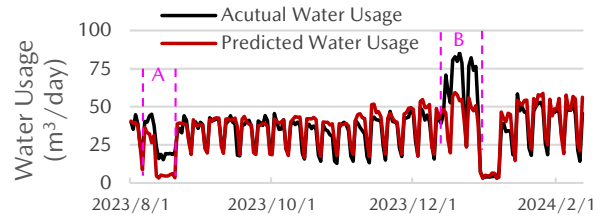


Fig. 6 Prediction Results for Out-of-Sample Data

学習範囲内データに対しては、水使用実績と予測値がおおよそ一致しているため、過学習の可能性を除外すれば比較的精度の高い学習ができていられる。

学習範囲外データに対して、前述のとおり、使用実績が予測値より約10%以上多い期間を異常として抽出したのがAとBの期間である。過去の漏水トラブルと比較すると、この期間に漏水が起っていたことを確認できた。

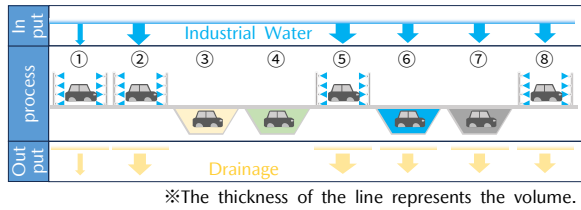
学習範囲内データ、学習範囲外データともに良好な結果が得られ、水使用実績が予測値を10%以上超える場合は、漏水や異常使用として検出できる仕組みを構築した。引き続き、予測の精度向上を目指しつつ、他領域への横展開を進めていく。

- ※2 機械学習やデータ解析等で利用されているプログラム言語の一つ
- ※3 複数の機械学習モデルを組み合わせ一つの予測結果を生成する手法
- ※4 アンサンブル学習の一種で、複数のモデルから得た予測結果を次のモデルに入力して最終的な予測を行う方法
- ※5 スタッキング法の第一段階で用いられるモデル（本論文では、Linear Regressionとk-Nearest Neighborsを使用した）
- ※6 スタッキング法の第二段階で用いられるモデル（本論文では、k-Nearest Neighborsを使用した）

## 4. 塗装工場の節水

### 4.1 塗装工場の概要

本社工場内で最も水使用量の多い塗装工場（約1,300千m<sup>3</sup>/年）を対象とした。過去、塗装工場の水洗シャワーの間欠運転化による節水で約50千m<sup>3</sup>/年を削減した事例もあるが、それ以降踏み込めていなかった。塗装工程は下塗り工程と上塗り工程に大別でき、混流生産方式の採用により同一ラインで複数車種の生産を行っている。水使用量は下塗り工程の方が多く、使用用途はボディー水洗や電着塗料の冷却である。下塗り工程のフローを Fig. 7 に示す。



**Painting process:**①Hot Rinsing, ②Flushing, ③Surface treatment, ④Coating Conversion, ⑤Flushing, ⑥Pure water rinsing, ⑦Electrodeposition coating, ⑧Flushing

Fig. 7 The Flow of the Undercoating Process

本論文では、下塗り工程の中で水使用量が最も多い水洗工程 (Fig. 7 の⑤) において約 150 千 m<sup>3</sup>/年の削減を実現した取り組みを紹介する。水洗工程の水の流れを Fig. 8 に示す。水洗槽と水槽がセットであり、シャワーから出た水はボディに当たり水槽に落ちる。その水が循環ポンプで再びシャワーに送られる。この循環過程で水は汚れるため、補給水により濃縮を防いでいる。また、水洗工程は直列で複数あるため、後段ほどボディの洗浄が進み、水の汚染度が低い (1 次水洗より 2 次水洗の循環水の方がきれい) という特徴がある。

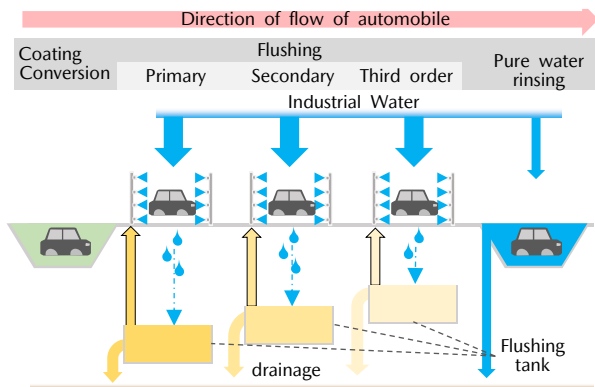


Fig. 8 Details of the Flushing Process

#### 4.2 水洗工程の目指す姿と課題

水洗工程の目指す姿は、どのボディに対しても必要最小量の補給水で洗浄を実現することである。Fig. 9 に示すように、各水洗槽での補給量を最小に抑えた上で、後段の水洗槽で使い切った水を前段にカスケード利用することで、水洗工程全体での水使用量を適正化することを目指している。

この目指す姿に対して、①補給量の基準がなく車種によらず常に一定で補給されていた、②一番後段の rinsing 工程では、水が滞留しやすく、菌が繁殖 (Fig. 10) することがあり、品質不良の懸念からカスケード利用を実現できずにいた、という 2 つの問題があった。これを解決するための課題として、①全車種に対して有効な補給量基準の策定、②安定的な菌の除去方法の策定を設定し、対策を検討した。

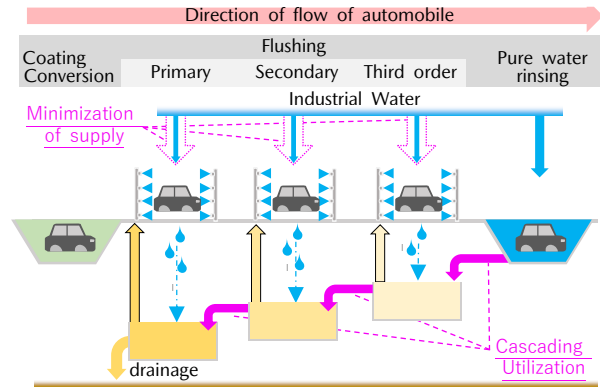


Fig. 9 Desired Flow of the Flushing Process



Fig. 10 Bacteria in the Washing Water

#### 4.3 課題①の対策：電気伝導度を用いた補給量最適化

日々の生産状況や水洗槽の状態により、同車種でも洗浄に必要な水量が毎回バラつくことが考えられたため、直接水量基準を定めるのではなく、水質基準を設定し、その基準を満たすように補給量をコントロールする方法を採用した。過去、水洗工程で品質影響が出た際には、循環水が濃縮していることが多かったため、水洗槽の濃縮度合いと水の汚れ度合いを示す電気伝導度の関係を確認したところ、正の相関 (R=0.876) があることを確認できた。そのため、電気伝導度を基準に採用した。また、一番後段の水洗槽 (Third order flushing tank) の電気伝導度を測定した結果を Fig. 11 に示すが、時間によって電気伝導度の数値にバラつきがあることを確認できた。これは、常に一定量を補給しているため、水洗槽内の水質にバラつきがあることを示している。電気伝導度が最大の 100μS/cm の時でも生産品質に影響がないことを確認できたため、電気伝導度が 100μS/cm 以下の時は、補給量が過剰であるといえる。そこで、水槽に電気伝導度計を設置し、100μS/cm を基準として補給量を制御する対策を実施した。他の水洗槽 (Primary & Secondary flushing tank) でも同様に電気伝導度の基準を定め、補給量制御を実施した。これにより、必要最小量の補給を実現し、約 100 千 m<sup>3</sup>/年の削減につながった。また、電気伝導度を基準としたことで、水洗槽内の水質レベルが常に一定となり、クルマの生産品質の安定化にもつながった (Fig. 12)。

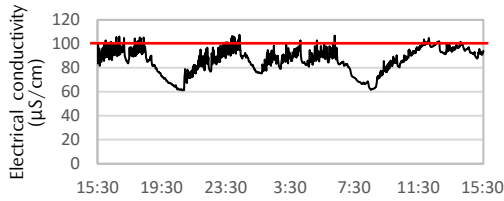


Fig. 11 Measurement Results of the Electrical Conductivity in the Third Order Flushing Tank (Before Measures)

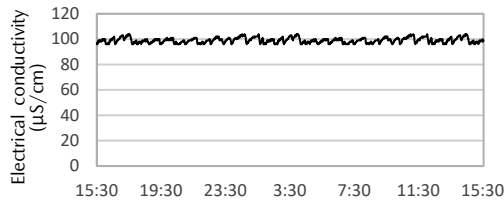


Fig. 12 Measurement Results of the Electrical Conductivity in the Third Order Flushing Tank (After Measures)

4.4 課題②の対策：ディスクフィルターを用いた菌の除去

まず、菌の除去がどの程度で必要かを検討した。菌は、単体であれば数 $\mu\text{m}$ 程度であり、これらの集合体は数 $100\mu\text{m}$ 以上にもなる。菌による品質影響が出た際の過去履歴を確認したところ、 $100\mu\text{m}$ 以上の集合体が存在した時に品質影響が出ていることが分かった。そのため、安全率を考慮し、 $50\mu\text{m}$ を除去基準とし、除去方法の検討を行った。生産品質に影響を与えないこととメンテナンスが容易なこと等を考慮し、ディスクフィルターを採用した。水洗工程に設置し、菌を除去できることを確認した (Fig. 13)。これにより、リンス工程から水洗槽へのカスケード利用を実現し、約 $50\text{千 m}^3/\text{年}$ の削減につながった。

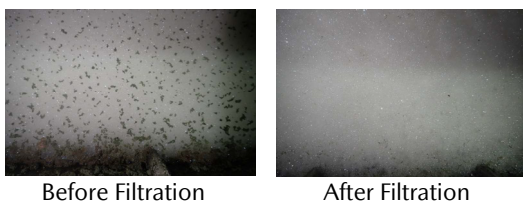


Fig. 13 Condition before and after Bacteria Removal

4.5 取り組みの今後

本論文で定めた電気伝導度の基準には見直しの余地があるため、補給量の適正化に向けて検討を継続していく。また、節水取り組みと並行して再生水利用案の検討も進め、節水が完了し次第、塗装工場での再生水利用の実現も目指す。

5. トイレフラッシング水への再生水・雨水利用

5.1 再生水・雨水利用の概要と方針

取水した水を工場や事務所ビルなどで使用し、排出した廃水は適正に処理して河川や海に放流している。これまでは一方通行だったこの水の流れを循環させるために、再生水利用の検討を開始した。目指す姿を Fig. 14 に示す。

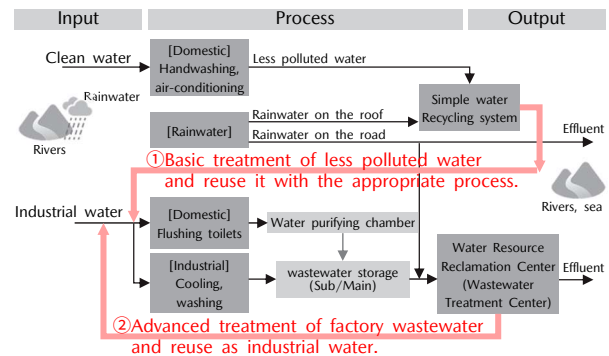


Fig. 14 The Targeted Flow of Water Resource Circulation

Fig. 14 に示すとおり、2つのアプローチで進める方針とした。

●アプローチ1：廃水系統の下流ほど廃水が混ざり合い、汚染度の高い水となって再生が困難になるため、廃水を上流側で回収し、簡易処理を施した再生水を特定の利用先で利用する。

●アプローチ2：水資源再生センターの処理水に高度処理を施した再生水を工業用水の代用として利用する。

更に、再生コストや衛生面を考慮し、①トイレフラッシングで使用した水、②高濃度廃水、③蒸発した水については、再生処理できない水として定めた。

本論文では、アプローチ1で約 $15\text{千 m}^3/\text{年}$ の再生水利用を実現したトイレフラッシング水に対する取り組みについて紹介する。なお、アプローチ2の検討も進めており、対象となる構内区域に対し、工業用水と同等レベルで使用できる再生水の生成プロセスの確立を目指している。

5.2 トイレへの再生水利用における課題と対策

再生水の源となる廃水は水質面でばらつきがある。このばらつきのある廃水に対して、一定の水質となるように安定して再生処理するための技術の知見がないという問題があった。この問題に対し、①トイレフラッシング水に再生水を使用するための水質基準の策定、②基準を満たす再生水をつくるための再生処理プロセスの構築を課題として設定した。

(1) 課題①の対策：再生水水質基準の策定

水質基準は、既存の基準である建築物環境衛生管理基

準<sup>(1)</sup>を参考にした。しかし、この基準は外観基準と衛生基準等に関する定性的な基準であるため、定量的な指標にする必要があった。

そこで、外観基準である濁度と色度の基準を定量化するために、トイレフラッシング水に使用している工業用水の直近1年分の水質データを確認し、1年間の最大値を再生水基準とした。実際の透明性等を確認するために、目視による評価も実施し、基準に問題がないことを確認した。

次に、衛生基準である“大腸菌群数の不検出”を定量化するために、どのくらいの残留塩素濃度であれば不検出となるかを評価した。その結果、0.2mg/L以上で雑菌が瞬時に死滅することを確認した。更に、雑菌が死滅することでアンモニア臭も抑えられ、臭気基準もクリアできることが分かった。これらの基準値をまとめたものをTable 2に示す。

Table 2 Determination of Recycled Water Standards

	Standards for Environmental Sanitation Management of Buildings	Recycled water standards for toilet flushing water		
Appearance	Almost colorless and Transparent	Turbidity	8NTU or less	
		Color	15degrees or less	
Hygiene	pH	5.8~8.6	pH	5.8~8.6
	Coliform Count	Not detected	Residual chlorine concentration	0.2mg/L or more
	Odor	Not abnormal		

(2) 課題②の対策：再生処理プロセスの構築

再生水をトイレで利用するために、再生循環装置は対象トイレの近くに設置することが求められた。そのため、設置面積はできるだけ小さくする必要があったため、装置をコンパクトに設計できる膜分離技術を検討した。Fig. 15に示す膜の種類ごとの除去性能を参考に、濁度と色度をねらいまで下げるためには中空糸膜での再生処理が効果的であると考えた。

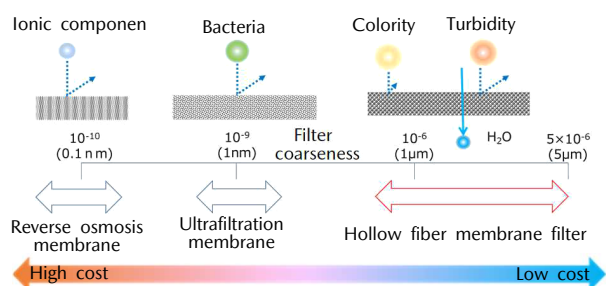


Fig. 15 Image of Removal Performance and Cost by Filter Type

再生水の原水として利用予定の廃水と中空糸膜フィルター（粗さ5µm）を使用して、25日間の通水テストを実施した。濁度や色度の異なる廃水（約1m<sup>3</sup>）を毎日フィルターに通水し、濁度と色度の除去量や除去能力の持続性、通水量の持続性を評価した。その結果をFig. 16に示す。

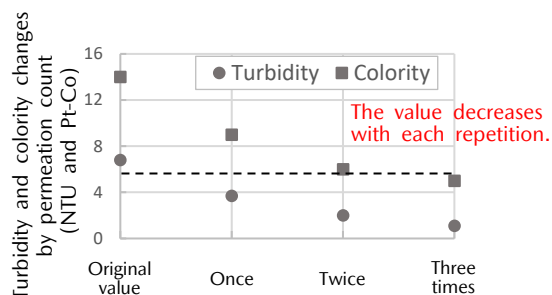


Fig. 16 Test Results Using Hollow Fiber Membrane Filter

検証の結果、中空糸膜フィルターに3回以上通水することで濁度と色度の基準を満たすことが判明した。このことを踏まえて考案した再生循環装置の処理プロセスの概略をFig. 17に示す。

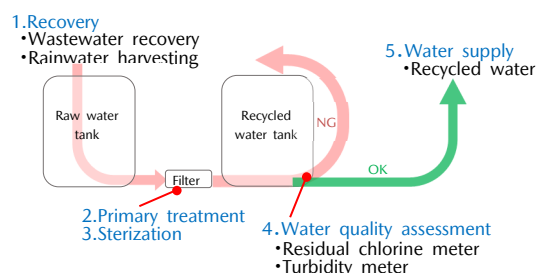


Fig. 17 Design of the Regeneration Circulation System

また、再生循環装置の現物写真をFig. 18に、再生処理前後の水の写真をFig. 19に示す。



Fig. 18 Regeneration Circulation System

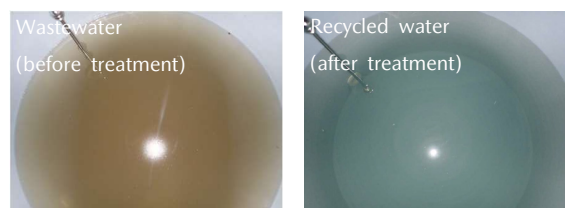


Fig. 19 Before and after Regeneration Treatment

## 6. おわりに

“水資源を価値あるものに使い切る”を目指す姿とし、その実現に向けた具体的な取り組みについて紹介した。節水の取り組みでは、パワートレイン工場や組立工場等、生産領域の更なる水使用量の削減に踏み込んでいく。再生水・雨水利用についても、生産設備への適用を目指し、再生技術を進化させていく。それとともに、中期的なターゲットである2030年に向けて、他工場や他拠点、関連会社へも横展開し、国内マツダグループとしての目標達成を目指す。更に、次のターゲットである2050年に向けては、海外拠点にも活動を広げ、世界的な水リスクや水ストレスの削減に貢献したい。

## 参考文献

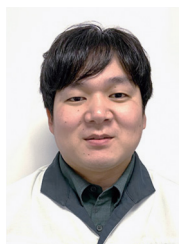
- (1) 厚生労働省ホームページ 建築物環境衛生管理基準<sup>※7</sup>  
について 3 給水の管理 (3) 雑用水の管理

※7 建物内の空気、水、清掃、害虫防除などを適切に管理し、利用者の健康と快適な環境を確保するための基準。

## ■著者■



松本 祐太郎



矢野 雅人



有村 恒星



添田 伸行



綿崎 修



古瀬 亘